

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ В.И. Харук
подпись
« ____ » _____ 2017 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Исследование многолетней динамики тепловых аномалий в г. Красноярске
по данным спутниковых изображений в тепловом инфракрасном диапазоне

09.03.02 - Информационные системы и технологии

Руководитель _____ доцент кафедры Б-ГИС, к.-ф.-м.н. О.Э. Якубайлик
подпись, дата

Выпускник _____ А.С. Феофилов
подпись, дата

Нормоконтролер _____ Е.В. Федотова

Красноярск 2017

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ В.И. Харук

« ____ » _____ 2017 г

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы**

Студенту Феофилу Артему Сергеевичу.

Группа КИ 13-21Б, Направление 09.03.02 – Информационные системы и технологии.

Тема выпускной квалификационной работы «Исследование многолетней динамики тепловых аномалий в г. Красноярске по данным спутниковых изображений в тепловом инфракрасном диапазоне».

Утверждена приказом по университету № 2929/с от 07.03.2017

Руководитель ВКР О.Э. Якубайлик, к.ф.-м.н., доцент кафедры Б-ГИС, старший научный сотрудник ИВМ СО РАН.

Исходные данные для ВКР: фрагменты мультиспектральных изображений со спутника Landsat 8, которые находятся в свободном доступе на сайте министерства геологической службы США.

Перечень рассматриваемых вопросов (разделов ВКР): Научная постановка задачи и обзор современных методов обнаружения тепловых аномалий; обзор используемых методов, инструментов и исходных данных; построение карты температуры поверхности земли; выявление многолетней динамики тепловых аномалий; результаты работы: карты тепловых аномалий.

Перечень графического материала: слайды презентации.

Руководитель ВКР _____

О.Э. Якубайлик

Задание принял к исполнению _____

А.С. Феофилов

« ____ » _____ 2017 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Исследование многолетней динамики тепловых аномалий в г. Красноярске по данным спутниковых изображений в тепловом инфракрасном диапазоне» содержит 43 страницы текстового документа, 1 приложение, 20 использованных источников.

ГОРОДСКОЙ ОСТРОВ ТЕПЛА, ТЕПЛОВЫЕ АНОМАЛИИ, КРАСНОЯРСК, LANDSAT, NDVI, ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ.

В работе были исследованы температурные аномалии в пределах города Красноярска, построены карты температуры поверхности, обнаружены тепловые аномалии.

Целью работы является анализ температурных аномалий в пределах города Красноярска по данным спутниковых изображений в тепловом инфракрасном диапазоне спутника Landsat 8.

Задачи работы:

- построить карты температуры поверхности земли в г. Красноярске по данным спутниковых изображений в тепловом инфракрасном диапазоне по данным со спутника Landsat8;
- выполнить анализ построенных карт температур поверхности;
- исследовать динамику изменения тепловых аномалий в г. Красноярске.

В результате выполнения выпускной квалификационной работы были представлены карты тепловых аномалий в городе Красноярск по данным спутниковых изображений в тепловом инфракрасном диапазоне, исследована динамика тепловых аномалий в городе Красноярск.

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	2
Введение	4
1 Научная постановка задачи и обзор современных методов обнаружения тепловых аномалий	7
1.1 Определение понятия городского острова тепла	7
1.2 Природа теплового излучения	9
1.3 Физические процессы излучения тел	11
1.4 Излучение объектов на земной поверхности	13
1.5 Коэффициент излучения поверхности	15
2 Обзор используемых методов, инструментов и исходных данных	17
2.1 Методы обнаружения тепловых аномалий	17
2.1.1 Зарубежные работы	17
2.1.2 Российские исследования	20
2.2 Выбор программного обеспечения	24
2.2.1 Геоинформационная система ArcGIS	25
2.2.2 Геоинформационная система QGIS	27
2.3 Исходные данные	28
3 Построение карты температуры поверхности земли	30
3.1 Предварительная обработка и коррекция данных	30
3.2 Вычисление NDVI	32
3.3 Вычисление коэффициента излучения поверхности по NDVI	33
3.4 Вычисление температуры поверхности	35
4 Выявление многолетней динамики тепловых аномалий	37

4.1 Вычисление температуры в разные даты на территории г. Красноярска	37
4.2 Результат работы	40
Заключение	41
Список использованных источников	42
Приложение А. Карты тепловых аномалий города Красноярск.....	44

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия отмечается устойчивый рост научного и общественного интереса к климатическим особенностям мегаполисов – в частности, городскому острову тепла или urban heat island (UHI).

В городской среде происходит сильнейшее антропогенное воздействие на все компоненты ландшафта. Одним из факторов, значительно преобразующим экосистему города, является запечатывание дневной поверхности почвенного покрова плотными слабо влагопроницаемыми дорожными покрытиями (бетон, цементные плиты, асфальт, щебень и др.).

Весьма неблагоприятным и малоисследованным аспектом запечатанности поверхности является эффект острова тепла: накопление тепла на территории города за счет значительного снижения альбедо покрытий из бетона и асфальта по сравнению с естественными ландшафтами. В больших городах разбежка температур город-пригород составляет 3–5 градусов Цельсия. Но при определённых погодных условиях городской остров тепла способен отличаться от пригорода на 10 градусов Цельсия и более.

Такие условия в приземном слое атмосферы являются неблагоприятными, препятствуя естественной циркуляции воздушных масс, что способствует накоплению концентрации загрязняющих веществ в городском воздухе.

Изучение микроклимата урбанизированных территорий началось в середине XX века, к нынешнему временному периоду накоплен довольно огромный объём исследований данного явления.

Осуществление исследований традиционными методами, основанными на результатах натурных исследований, является крайне трудоёмким, дорогостоящим и тяжело выполнимым процессом. Альтернативой традиционным подходам способен служить анализ цифровых моделей

рельефа (ЦМР) средствами современных геоинформационных систем (ГИС), которые получили развитие и стали широко доступными даже обычным пользователям в 90-х гг. XX в.

Возникновение цифровой модели рельефа довольно высокого пространственного разрешения, а также рост вычислительных способностей персональных компьютеров содействовали формированию в геоинформационных системах функциональных возможностей по анализу исследования тепловых аномалий.

Исследование городского острова тепла крайне важно не только с научной стороны, но и для учета особо вредных и опасных для жителей и окружающей среды метеорологических условий. Новейшие результаты закономерностей развития острова тепла позволят увеличить возможности системы раннего предупреждения о гидрометеорологических явлениях.

Искусственная антропогенная среда города Красноярска сильно изменяет температуру поверхности в сравнении с естественным природным ландшафтом.

Красноярск – один из крупнейших городов в России, крупный общекультурный, финансовый, производственный и образовательный центр территории Центральной и Восточной Сибири. Красноярск является административным центром Красноярского края (второго по площади субъекта России), а так же крупнейшим из старинных городов Сибири. Основан Красноярск в 1628 и расположен в центре России на обоих берегах реки Енисей, на стыке Среднесибирского плоскогорья, Западносибирской равнины и Саянских гор; в котловине, образованной самыми северными отрогами Восточных Саян.

Население города составляет 1 066 934 человека на 2017 год [8].

Объект исследований – температурные аномалии в пределах города Красноярска.

Цель работы – анализ температурных аномалий в пределах города Красноярска по данным спутниковых изображений в тепловом инфракрасном диапазоне спутника Landsat8.

Задачи:

- построить карты температуры поверхности земли в г. Красноярске по данным спутниковых изображений в тепловом инфракрасном диапазоне по данным со спутника Landsat8;
- выполнить анализ построенных карт температур поверхности;
- исследовать динамику изменения тепловых аномалий в г. Красноярске.

1 Научная постановка задачи и обзор современных методов обнаружения тепловых аномалий

1.1 Определение понятия городского острова тепла

Городской остров тепла – повышение температуры воздуха внутри города по сравнению с температурой окружающей местности. Явление острова тепла в поле приземной температуры воздуха присуще любым городам и даже любым населенным пунктам; чем больше поселок или город, тем больше, как правило, разность температуры внутри него и в условиях фоновой местности за его пределами [8].

Это явление впервые открыто выдающимся английским метеорологом - Люком Говардом в 1820 году на примере сравнения температуры в Лондоне и в его окрестностях [9].

Остров тепла является отражением суммы микроклиматических изменений, связанных с антропогенными преобразованиями городской среды.

Существует несколько факторов повышения температуры в городе:

- значительная теплоемкость асфальтовых покрытий и стен бетонных зданий;
- существенно меньшие затраты тепла на испарение осадков вследствие их искусственного стока и на транспирацию растений из-за ограниченных зеленых насаждений;
- прямое воздействие источников тепла вследствие деятельности человека (отопления зданий) и др.

Даже изолированный комплекс зданий формирует микроклимат, который отличается от того, который был бы на этой местности в её естественном состоянии. Так же интенсивность городских островов тепла крайне сильно зависит от особенностей рельефа.

В условиях сложного рельефа на формирование острова тепла оказывают влияние различные локальные циркуляции. Помимо этого, заметное влияние оказывают крупные реки, протекающие по территории городов. Естественные условия еще более искажаются в условиях города из-за малого испарения. Солнечная энергия за городом расходуется утром на испарение росы, гуттацию растений и др., в городе непосредственно поглощается зданиями.

Эвапотранспирация в городе очень уменьшена, так как растительный покров мало распространен. Быстрое удаление осадков делает невозможным создание запасов влаги в почве и, следовательно, испарение с неё. Таким образом возрастает восходящий поток явного тепла в структуре радиационного баланса земли под техногенной инфраструктурой.

Как правило, наибольшая интенсивность острова тепла в суточном ходе наблюдается в первой половине ночи, наименьшая — в середине дня.

В случае, если условия способствуют развитию городского острова тепла, то максимальное различие температуры как правило отмечается через 2-3 часа после захода Солнца и исчезают в маленьких городах после полуночи. В крупных городах остров тепла сохраняется вплоть до восхода Солнца, что увеличивает минимальную температуру в самые утренние часы.

Наиболее веским подтверждением существования в городе острова тепла считается сравнение двух рядов температуры, из которых первый включает данные, полученные на территории будущего города до его строительства, а второй состоит из измеренных значений температуры уже в построенном городе. Осуществить на практике такое сравнение удастся крайне редко, но необходимое подтверждение можно получить по другому, а именно путем составления тренда температуры воздуха в растущем городе и общего климатического тренда в более широком регионе. Если для города первый из указанных трендов превышает второй, то можно с абсолютной уверенностью говорить о наличии в этом городе острова тепла [7].

Таким образом, можно отметить, что увеличение площади города и уплотнение застройки в городе приводят к увеличению эффекта городского острова тепла со временем. В том числе, остров тепла стремительно развивается в самых населенных городах. Безусловно, численность населения не является физической величиной, но она поддается обычной оценке в отличие от других параметров, таких как площадь, степень изменения условий на поверхности или количество производимого тепла. Это создает определенные сложности при интерпретации нынешних изменений климата по сведениям городских станций.

1.2 Природа теплового излучения

Тепловое излучение — электромагнитное излучение, возникающее за счёт внутренней энергии тела. Интенсивность теплового излучения и спектральный состав зависят от природы и температуры тел. Тепловое излучение является равновесным, т.е. в изолированной системе при постоянной температуре тела излучают за единицу времени с единицы площади столько энергии, сколько получают извне [16].

Все без исключения физические объекты, имеющие температуру, отличную от абсолютного нуля, постоянно излучают электромагнитное поле, возникающее за счёт внутренней энергии, которая обуславливает возможность спонтанных переходов между колебательно-вращательными уровнями молекул в газах, колебаний молекул в жидких и твёрдых телах и колебаний решётки в твёрдых телах [16].

Излучение ближайшей к нам звезды — Солнца — является важнейшим элементом существования биологической жизни на нашей планете. Излучение, приходящее от Солнца к внешнему наблюдателю на Земле, возникает в тонком поверхностном слое — фотосфере, и носит характер теплового излучения (излучения Планка) с температурой 6000 К.

Таким образом, если излучение падает на какое-либо тело, доля этого излучения отражается от поверхности. Причем ровная поверхность даст зеркальное отражение, матовая – позволит наблюдать диффузное отражение или так называемое рассеяние. Остальная часть излучения поглотится веществом и энергия излучения, в конечном счете, будет превращена в тепловую энергию. Процесс поглощения можно описать следующим образом: поглощаемое телом излучение увеличивает кинетическую энергию составляющих его атомов, которые совершают колебания вблизи положений равновесия. Средняя кинетическая энергия поступательного движения атомов определяет температуру тела, поэтому поглощение энергии приводит к повышению температуры. Соответственно, процесс теплового излучения сводится к уменьшению кинетической энергии за счет испускания атомами электромагнитной волны, уносящей с собой долю энергии атомов. В свою очередь, согласно законам термодинамики, уменьшение кинетической энергии атомов равнозначно понижению температуры тела.

Поскольку атмосфера задерживает и рассеивает весомую часть излучения, то в дистанционном зондировании Земли из космоса прием теплового излучения ведется только в участках спектра, соответствующих окнам прозрачности атмосферы (рисунок 1). Используются диапазоны 3,0-5,0 мкм и 8,0-14,0 мкм [16].

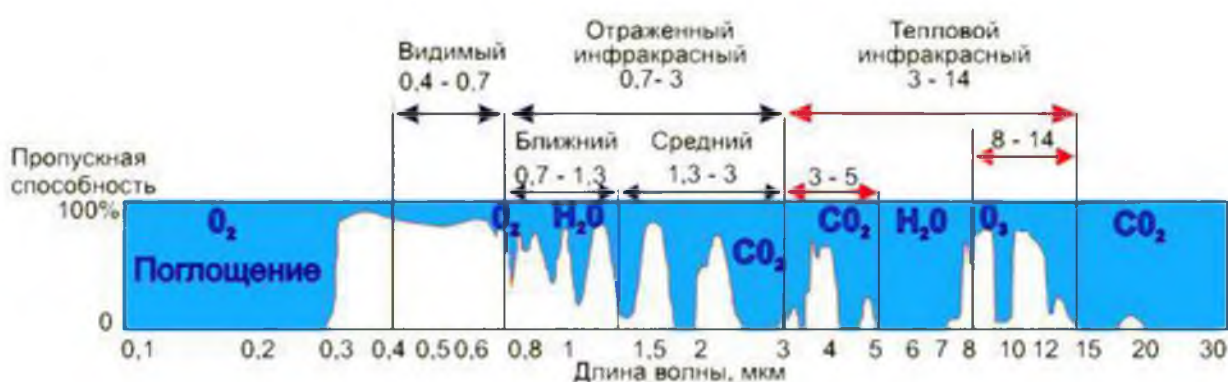


Рисунок 1 – Окна прозрачности атмосферы

В диапазоне 8,0-14,0 мкм озоновый слой земной атмосферы (O_3) поглощает большую часть теплового излучения с длиной волны от 9,2 мкм до 10,2 мкм. Именно поэтому спутниковые системы инфракрасного теплового зондирования фиксируют данные только в промежутках 8,0-9,2 мкм и 10,5-12,5 мкм для исключения этого участка поглощения электромагнитных волн. К примеру, первые три тепловых канала радиометра ASTER (10-12) охватывают диапазон от 8,125 до 9,275 мкм, а 13 и 14 каналы — от 10,25 до 11,65 мкм [16].

1.3 Физические процессы излучения тел

Для объяснения законов теплового излучения ещё в XIX веке было введено понятие абсолютно чёрного тела, под которым понимается идеализированная модель излучающего тела.

Абсолютно чёрное тело — физическое тело, которое при любой температуре поглощает всё падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах [16].

Таким образом, у абсолютно чёрного тела поглощательная способность равна 1 для излучения всех частот, направлений распространения и поляризаций.

Несмотря на название, абсолютно чёрное тело само может испускать электромагнитное излучение любой частоты и визуально иметь цвет. Спектр излучения абсолютно чёрного тела определяется только его температурой.

Одной из ключевых условных характеристик, которая устанавливает соответствие между тепловыми характеристиками абсолютно чёрного тела и реальных тел, которая позволяет дать оценку способности реального тела излучать, называется излучательной способностью.

Излучательная способность — это отношение мощности, излучаемой нагретой поверхностью, к мощности, излучаемой абсолютно черным телом при одинаковых температурах.

Тепловое излучение в том числе и при одинаковой температуре состоит из «комплекта» излучений с различными длинами волн. Величина участия разных длин волн в потоке теплового излучения тела, нагретого до обусловленной температуры, описывается законом Планка, формула (1):

$$\rho_{\lambda, T} = 4 u_{\lambda, T} / c \quad (1)$$

где u — излучательная способность абсолютно чёрного тела,

c — скорость света,

λ — длина волны,

T — абсолютная температура.

Совместное число излучения абсолютно всех частот возрастает стремительно быстро при увеличении температуры. Полная объёмная плотность равновесного излучения и полная испускательная способность абсолютно чёрного тела находятся в пропорции четвёртой степени его температуры. Данная зависимость носит название закона Стефана-Больцмана и выражается в формуле (2):

$$S = \sigma T^4 \quad (2)$$

где σ — постоянная Стефана-Больцмана,

T — абсолютная температура.

Таким образом, согласно закону Стефана-Больцмана, в реальных условиях различия в излучении объектов земной поверхности обусловлены различиями в значениях не только их температур, но и излучательной

способности. Соответствие поглощательной и излучательной способности объектов описывает закон Кирхгофа.

Г. Кирхгоф доказал, что отношение испускательной и поглощательной способностей не находится в зависимости от природы тела и является для всех тел одинаковой функцией частоты (длины волны) излучения и температуры: согласно закону излучения Кирхгофа, тело, которое при данной температуре сильнее поглощает, обязано интенсивнее излучать.

1.4 Излучение объектов на земной поверхности

Весьма значимым параметром, учитываемым при дистанционном зондировании земли, является излучательная способность объектов [16].

Объекты окружающего мира – растения, океаны, горная местность – имеют определённые свойства, которые устанавливают различие в интенсивности излучения различных объектов, которые имеют одинаковую температуру [3].

Два объекта, находящиеся на земной поверхности, могут обладать совершенно одинаковой собственной температурой, но при этом характеризоваться абсолютно разной интенсивностью теплового излучения, фиксируемой методами дистанционного зондирования, в силу различий значений их излучательной способности.

Излучательная способность тел, которая была определена на основе спутниковых данных, зависит от определённого набора свойств и условий, находящихся в зависимости как и от свойств этих объектов, так и от особенностей получения информации об этих объектах [16]:

- цвет (объекты, находящиеся на Земле, которые имеют более тёмный цвет, лучше излучают и поглощают электромагнитную энергию (у них выше излучательная способность), нежели светлые объекты, которые отражают большую часть поступающей на их поверхность энергии);

- неровность поверхности (чем большую шершавость имеет поверхность объекта в сравнении с длиной, падающей на него волны, тем большую возможность имеет данная поверхность для поглощения и испускания энергии);

- влажность (чем больше объект содержит влаги, тем выше его способность излучать и поглощать энергию т.к. вода имеет очень высокую излучательную способность. Поэтому влажные участки земли обладают аналогичной излучательной способностью, как и непосредственно, участок с водой);

- сжатость материала (излучательная способность голой почвы зависит от степени спрессованности: чем рыхлее материал, тем меньше его возможность поглотить тепловую энергию);

- пространственный диапазон и разрешение съёмки (излучательная способность малых объектов и состоящих из них более больших объектов при съёмке с различным разрешением отличается. Так, например, излучательная способность одного листа дерева, измеренная с помощью теплового радиометра высокого разрешения, будет отличаться от всей кроны дерева, которая видна при применении радиометров более низкого разрешения);

- длина волны (излучательная способность находится в зависимости от длины волны излучения каждого объекта. Разные объекты излучают волны немного различной длины);

- угол обзора (излучательная способность каждого объекта меняется в связи с изменением угла, под которым его регистрирует датчик).

Излучательная способность абсолютно черного тела принимается за единицу, а для всех реальных объектов она лежит в пределах между 0 и 1.

Излучательная способность определённых материалов приведена в таблице 1 [16].

Таблица 1 – Излучательная способность определённых материалов

Материал	Излучательная способность
Вода	0,92-0,98
Бетон	0,71-0,90
Асфальт	0,95
Почва	0,92
Растительность	0,98
Трава	0,97
Металл	0,07-0,20
Снег	0,84
Краска	0,90-0,96
Кожа	0,98
Абсолютно чёрное тело	1

Заметно невысоким значением излучательной способности среди материалов отличаются стекло и металл, это приводит к возникновению на снимках в тепловом инфракрасном диапазоне отличительных тёмных пятен на участках, где находятся постройки и здания со стеклянной или отполированной металлической крышей.

1.5 Коэффициент излучения поверхности

Коэффициент излучения поверхности (степень черноты) показывает отношение энергии теплового излучения серого тела к излучению абсолютно черного тела при той же температуре [16].

Он является ключевым фактором при определении поверхностной температуры по данным тепловой инфракрасной съемки. Коэффициент излучения может быть определен с помощью стандартного термометра излучения.

Однако этот метод может быть эффективно применен только при выполнении исследований преимущественно в лабораторных условиях. В

этом плане методы дистанционного зондирования имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами.

Эти преимущества заключаются в масштабности обзора, возможности получения глобальной и локальной одномоментной информации о природных объектах.

Соответствующие возможности спутниковых данных могут быть эффективно использованы для определения коэффициента излучения, а также для оценки на его основе температуры земной поверхности. Для этих целей могут быть использованы снимки как высокого, так и среднего пространственного разрешения.

В этой работе будет использоваться методика, основанная на индексе NDVI. Вегетационный индекс нормированной разности (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) был разработан Rouse B.J. в 1973 г. и вычисляется по стандартной формуле (3):

$$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (\rho_{nir} + \rho_{red}) \quad (3)$$

где ρ_{red} – коэффициент отражения в красной спектральной зоне;

ρ_{nir} – коэффициент отражения в ближней инфракрасной зоне.

В методе, разработанном Van De Griend A., Owen M [5], коэффициент излучения поверхности e определяется на основе его зависимости от индекса NDVI по следующей формуле (4):

$$e = 1,0094 + 0,047 \ln(NDVI) \quad (4)$$

Этот метод простой, но он может быть эффективно применен для однородных областей с одним типом поверхности (Valor, Caselles, 1996) [4].

2 Обзор используемых методов, инструментов и исходных данных

2.1 Методы обнаружения тепловых аномалий

2.1.1 Зарубежные работы

Исследованием городского острова тепла в мире занимаются с 1820 года, когда было открыто данное явление. Но более информативными и наглядными являются исследования, произведённые с помощью спутниковых данных.

Космические снимки ASTER/Terra города Индианаполис (США, штат Индиана) в тепловом инфракрасном диапазоне, разрешение 90 м [15]. Для Индианаполиса характерно типично летнее состояние, когда вода заметно холоднее (темнее на снимках), чем территория города (рисунок 2).

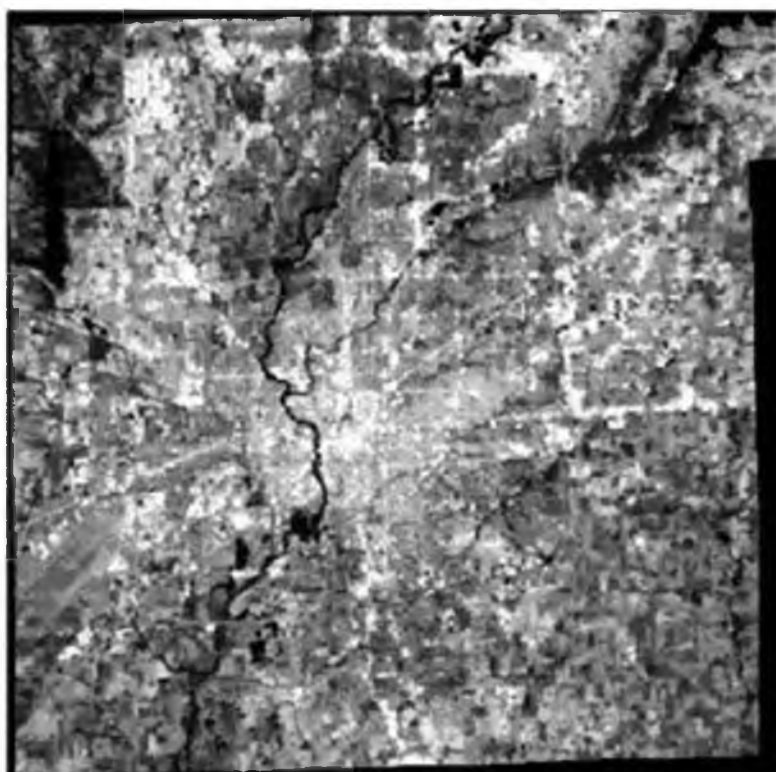


Рисунок 2 – Космический снимок ASTER/Terra г. Индианаполис (США) в тепловом инфракрасном диапазоне.

Известны примеры комплексирования данных теплового диапазона высокого и низкого разрешения (MODIS, ASTER, Landsat), полученных с разных спутников, при изучении особенностей городского острова тепла. Объединённое применение данных различного пространственного разрешения особенно ценно тем, что предоставляет возможность использовать преимущества как снимков большого охвата, так и снимков высокого разрешения. Среди результатов таких работ обычно присутствуют рекомендации по использованию снимков того или иного разрешения для изучения городского острова тепла на разных пространственных уровнях.

Зачастую для исследования пространственных особенностей городского острова тепла используют различные виды классификаций по снимкам со спутника в тепловом инфракрасном диапазоне. Обычно, такие методы применяют для исследования "использования земель" и создания "карт земных покровов" (land cover/land use), (рисунк 3). Больше всего к исследованиям land cover/land use привлекают снимки в различных спектральных диапазонах, одним из которых является тепловой. При анализе связи между типами «использования земель» и тепловыми аномалиями, создаются карты land cover/land use. Многократно указывается на наличие взаимосвязи между структурой городского острова тепла и характеристикой земного покрова (land cover/land use), а также на возможность применения тепловых снимков как надёжного источника данных для получения информации о характере использовании земель [15].

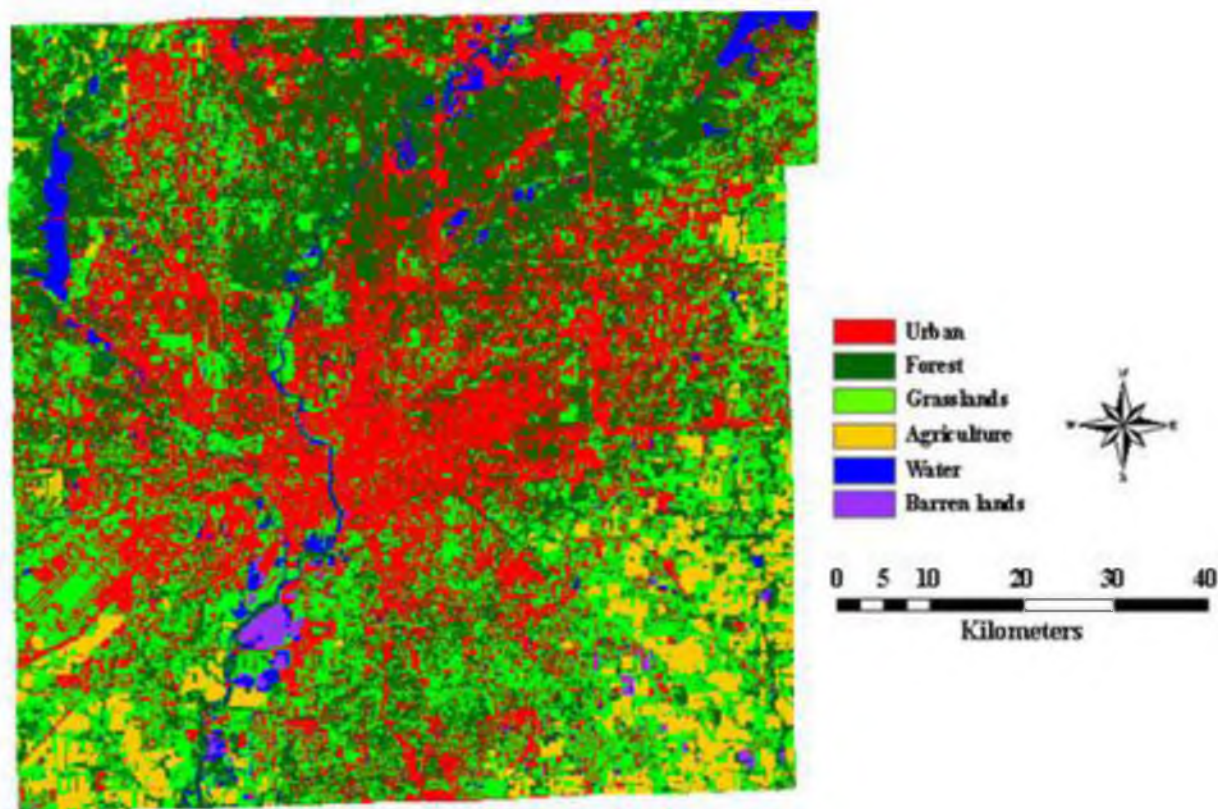


Рисунок 3 – Изображение land cover/land use на г. Индианаполис (США)

Имеют место и комплексные исследования, которые сочетают исследование суточной и сезонной динамики в городах с разными климатическими условиями, статистический анализ, изучение связи между изображениями NDVI и картами land cover/land use, изучение тепловых потоков. В подобных трудах используются как снимки низкого пространственного разрешения и большого охвата, так и снимки со спутников Landsat. Исследования подобного типа дают многостороннюю оценку явления городского острова тепла и вносят значительный вклад в изучение климата города и воздействия урбанизации [15].

2.1.2 Российские исследования

Исследованием городского острова тепла в России активно занимается географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова. Географический факультет использовал космические снимки в тепловом инфракрасном диапазоне для географических исследований и картографирования многолетней динамики тепловых аномалий в городе Москва [14].

Снимок Landsat ETM+ 6 октября 1999 года (Рисунок 4) был получен в 08:56 (UTC) 06.10.1999. На момент съемки температура воздуха составляла около $+20^{\circ}\text{C}$, видимость 6 км, облачность 0 баллов. Минимальная зафиксированная температура в течение суток была $+10^{\circ}\text{C}$, а среднесуточная температура $+16^{\circ}\text{C}$. Погодные условия в течение предшествующей недели наблюдались следующие: среднесуточная температура держалась в районе $+14-16^{\circ}\text{C}$, минимальная температура не опускалась ниже $+9^{\circ}\text{C}$.

Природную фенологическую и агротехническую ситуацию на момент съемки можно охарактеризовать следующим образом: листва на деревьях в городе и за его пределами уже практически полностью пожелтела, сельскохозяйственные поля распаханы после сбора урожая, снежный покров полностью отсутствует. Земля после лета очень сильно прогрета, хорошо прогреты также водные объекты, которые собирали тепло в течение всего летнего сезона. Температура воздуха на протяжении нескольких месяцев, начиная с мая, не опускалась ниже $+5^{\circ}\text{C}$.

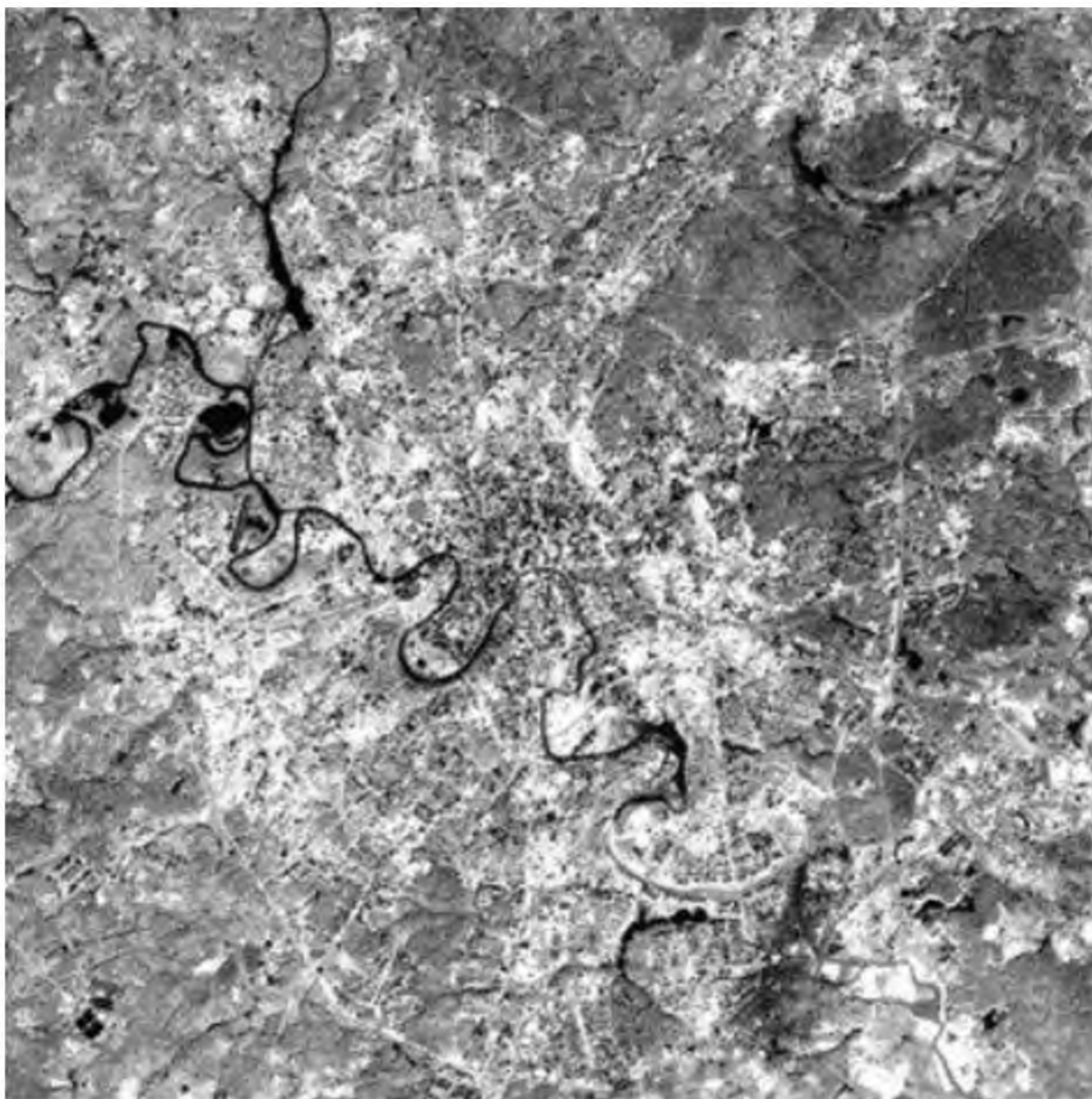


Рисунок 4 – Фрагмент теплового инфракрасного снимка ETM+/Landsat-7 за 06.10.1999 г.

Более тёмным тоном изображаются самые "холодные" объекты, а именно, объекты с металлической поверхностью (их излучательная способность очень низка). Несколько более "тёплые" объекты - это холодные водные объекты. Более светлыми тонами на снимке изображается лесная растительность, причем хвойная - темнее, чем широколиственная. Травяной покров представлен серыми оттенками. Наиболее светло-серыми оттенками изобразились на спутниковом снимке жилая застройка и сеть дорог [14].

По полученному снимку Landsat ETM+ была составлена карта тепловых аномалий города Москва (рисунок 5).

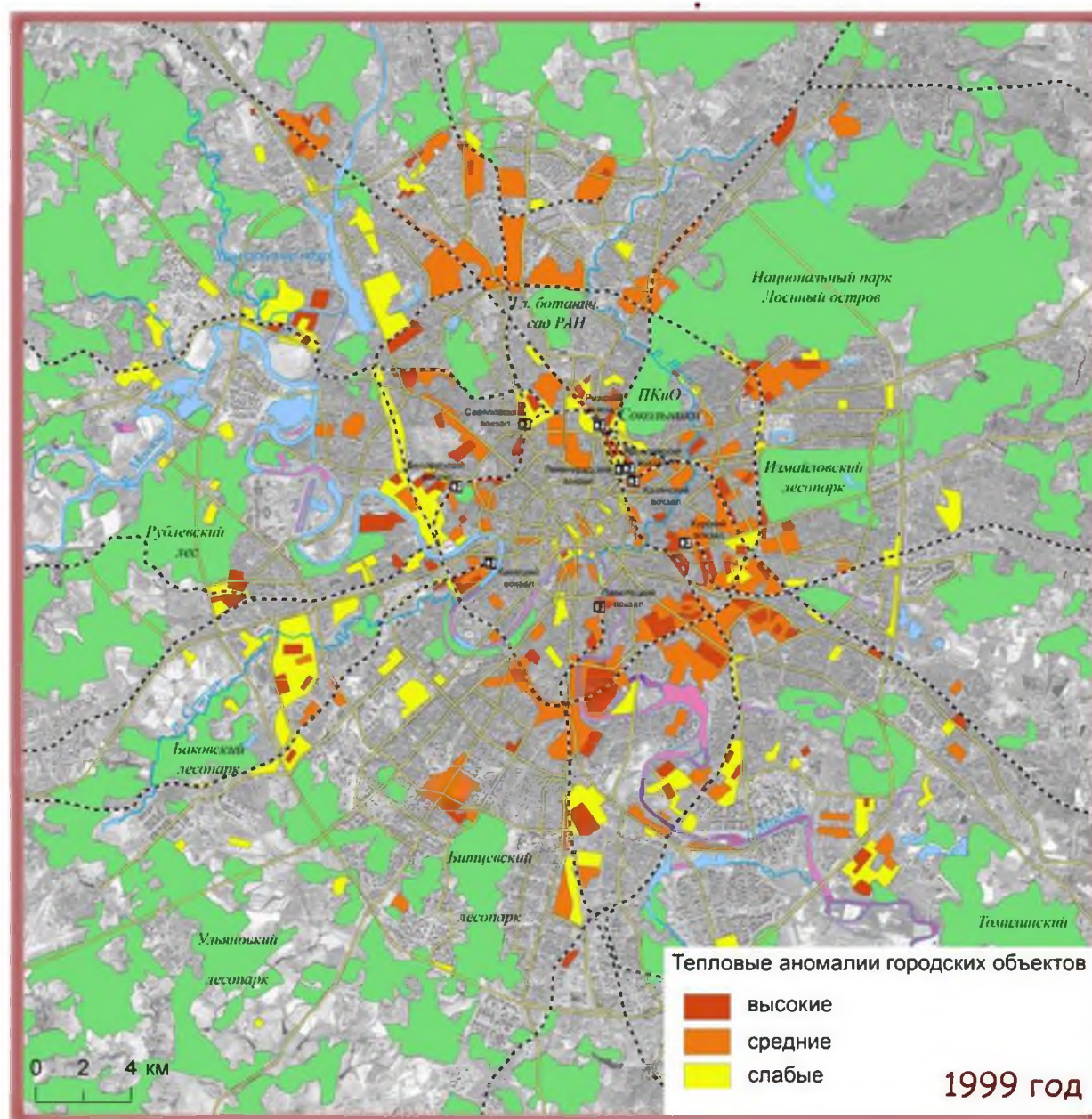


Рисунок 5 – Карта тепловых аномалий городских объектов города Москва за 1999 год

Анализ полученной карты позволяет выявить снижение выраженности тепловых аномалий в центре города в пределах Садового кольца и за его пределами, главным образом в восточной половине города. Помимо этого, хорошо заметно улучшение состояния р. Москвы, которое можно объяснить проведением природоохранных мероприятий, которые привели к снижению

сбросов загрязняющих веществ в реку от водопользователей - станций аэрации и городской водосточной сети. В то же время отмечается увеличение интенсивности тепловых аномалий, связанных с некоторыми промышленными предприятиями, особенно на севере и юго-востоке города.

Карта даёт возможность проанализировать пространственные особенности перераспределения тепловых аномалий разной степени выраженности в городе и его окрестностях.

Полученная карта хорошо согласуется с доступными литературными источниками, но при этом даёт зрительную картину пространственного распределения теплового поля территории Москвы и ближайших окрестностей [14].

Так же в этой области проводилось изучение феномена городского острова тепла в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных измерений и дистанционного зондирования на примере Норильска (рисунок 6).

Для решения поставленной проблемы использовались данные спутникового зондирования о температуре поверхности земли, полученные из космических снимков в инфракрасном диапазоне системы MODIS [18], включающей в себя спутники TERRA и AQUA, в каналах 31 и 32 (10,78–11,28 мкм и 11,77–12,27 мкм, соответственно). В исследовании использовались продукты, содержащие данные о температуре земной поверхности, рассчитанные по значениям интенсивности теплового излучения для спутников TERRA и AQUA, соответственно, имеющие пространственное разрешение 1000 м.

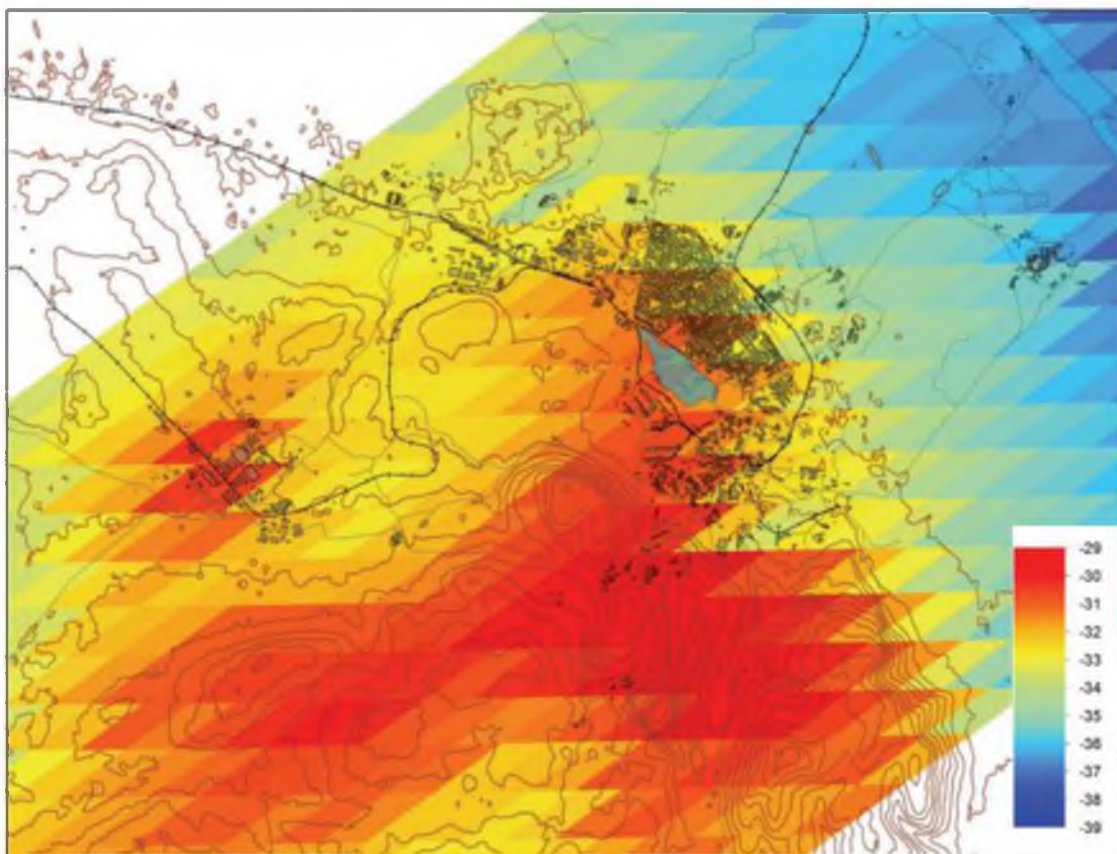


Рисунок 6 – Средняя температура поверхности в окрестностях Норильска по данным зондирований со спутника TERRA за период ноябрь 2013 г. – январь 2014 г

Необходимо отметить тот факт, что на сегодняшнее время проблеме городского острова тепла в нашей стране уделяется значительно меньше интереса, нежели за границей, что устанавливает значимость и актуальность подобных исследований в нашей науке.

2.2 Выбор программного обеспечения

Для решения поставленных в работе задач следует применять геоинформационные программные продукты.

На данный период существует очень много решений, которые позволяют проводить редактирование растровой и векторной информации,

производить различные преобразования, создавать новые векторные слои. Эти программы в основном разработаны зарубежными компаниями. Главными приложениями являются:

- Семейство геоинформационных программных продуктов компании ESRI ArcGIS;
- Свободная кроссплатформенная геоинформационная система QGIS.

2.2.1 Геоинформационная система ArcGIS

ArcGIS — семейство геоинформационных программных продуктов американской компании ESRI. Применяются для земельных кадастров, в задачах землеустройства, учёта объектов недвижимости, систем инженерных коммуникаций, геодезии и недропользования и других областях.

В случае, если разговор идёт о создании и управлении географическими данными, то продукты ArcGIS гарантируют богатый набор необходимых инструментов. ArcGIS представляет собой масштабируемый комплект программных продуктов для создания, анализа, интеграции, управления и представления географических данных.

Оставаясь практичными системами, содержащими самые популярные функции в границах возможностей малоопытных пользователей, программы ArcGIS также имеют и сложную функциональность, и возможность настройки наиболее опытными пользователями.

ArcGIS принадлежит к программам ArcView, ArcEditor, ArcInfo и расширениям ArcGIS. Хотя программы лицензируются независимо, ArcGIS является масштабируемым набором программ с равными базовыми приложениями и пользовательским интерфейсом.

Главными приложениями ArcGIS являются ArcMap, ArcCatalog и ArcToolbox.

ArcMap используется для работы с пространственными данными и создании картографических продуктов.

ArcCatalog предназначен для поиска и управления пространственными данными.

ArcToolbox обеспечивает средства конвертации и геообработки данных.

Каждая программа, входящая в ArcGIS, содержит в себя все эти три приложения. Функциональность программ со временем наращивается по мере перехода от ArcView к ArcEditor и далее к ArcInfo.

В результате ArcView и ArcInfo объединены на единой интегрированной платформе, созданы в соответствии с общей архитектурой и имеют одинаковый пользовательский интерфейс. Эта единая платформа для создания, управления и анализа географических данных значительно повышает удобство использования и взаимодействие между программами, которые в прошлом очень отличались по своим программным средам.

ArcView, ArcEditor и ArcInfo имеют следующие общие ключевые функции:

- расширенные средства редактирования;
- высококачественная картография;
- взаимодействие с Интернет;
- построение проекций «на лету»;
- геокодирование;
- инструменты, управляемые Мастерами;
- поддержка стандартов метаданных при помощи XML;
- базирующая на стандартах COM настройка;
- расширяемая архитектура;
- прямое чтение более 40 форматов данных.

2.2.2 Геоинформационная система QGIS

QGIS — свободная кроссплатформенная геоинформационная система. Работа над QGIS была начата в мае 2002 года, а в июне того же года — создан проект на площадке SourceForge [12].

Целью создания QGIS было сделать использование геоинформационных систем простым и лёгким для любого пользователя, чего создатели QGIS отчасти добились: интерфейс QGIS намного удобнее для неопытного пользователя, а в определённых нюансах даже обходит широко распространённые ГИС.

Данная система позволяет просматривать и накладывать друг на друга растровые и векторные данные в разных форматах и проекциях без преобразования во внутренний или единый формат. Поддерживаются следующие основные форматы:

- пространственные таблицы PostgreSQL с использованием PostGIS, векторные форматы, поддерживаемые установленной библиотекой OGR, включая shape-файлы ESRI, MapInfo, SDTS (Spatial Data Transfer Standard) и GML (Geography Markup Language) и др.;

- форматы растров и графики, поддерживаемые библиотекой GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), такие, как GeoTIFF, Erdas IMG, ArcInfo ASCII Grid, JPEG, PNG и др.

- базы данных Spatialite;

- растровый и векторный форматы GRASS (область/набор данных).

Имеется возможность анализировать векторные пространственные данные в PostgreSQL/PostGIS и других форматах, поддерживаемых OGR, используя модуль fTools, написанный на языке программирования Python. В настоящее время QGIS предоставляет возможность использовать инструменты анализа, выборки, геопроессинга, управления геометрией и базами данных.

Кроме того, возможно использование интегрированных инструментов GRASS, которые содержат в себе функциональность более чем 300 модулей GRASS.

QGIS можно применять для экспорта данных в map-файл и публикации его в сети Интернет, используя установленный веб-сервер Mapserver. QGIS может использоваться как клиент WMS/WFS и как сервер WMS.

QGIS легко адаптируется к специальным нуждам из-за того, что его архитектура может расширяться установкой дополнительных модулей. QGIS предоставляет библиотеки, которые могут использоваться для создания модулей. Возможно создание отдельных дополнений, используя языки программирования C++ либо Python.

Для данной работы была выбрана геоинформационная система QGIS, так как она обеспечивает полный набор необходимых инструментов для создания и управления географическими данными, а так же является бесплатным программным обеспечением.

2.3 Исходные данные

Исходные данные представлены в виде мультиспектральных спутниковых изображений Landsat 8, которые находятся в свободном доступе на сайте Министерства геологической службы США [17].

Свободные источники этих данных позволяют выбрать снимки без облаков, шумов и в любое время года.

Landsat 8 получает изображения в видимом диапазоне волн, в ближнем ИК и в дальнем ИК, с разрешением снимков от 15 до 100 метров на точку. Производится съемка суши и полярных регионов. В сутки снимается порядка 400 сцен. Сенсоры OLI и TIRS имеют более высокое отношение сигнал-шум (SNR) и позволяют снимать до 12 бит на точку. В таблице представлены характеристики спутника Landsat 8 [20].

Таблица 2 – Характеристика аппаратуры спутника Landsat 8.

Спектральный канал	Длины волн, мкм	Разрешение (размер 1 пикселя), м
Канал 1 — Побережья и аэрозоли (Coastal / Aerosol, New Deep Blue)	0.433 — 0.453	30
Канал 2 — Синий (Blue)	0.450 — 0.515	30
Канал 3 — Зелёный (Green)	0.525 — 0.600	30
Канал 4 — Красный (Red)	0.630 — 0.680	30
Канал 5 — Ближний ИК (Near Infrared, NIR)	0.845 — 0.885	30
Канал 6 — Ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 2)	1.560 — 1.660	30
Канал 7 — Ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 3)	2.100 — 2.300	30
Канал 8 — Панхроматический (Panchromatic, PAN)	0.500 — 0.680	15
Канал 9 — Перистые облака (Cirrus, SWIR)	1.360 — 1.390	30
Канал 10 — Дальний ИК (Long Wavelength Infrared, TIR1)	10.30 — 11.30	100
Канал 11 — Дальний ИК (Long Wavelength Infrared, TIR2)	11.50 — 12.50	100

3 Построение карты температуры поверхности земли

3.1 Предварительная обработка и коррекция данных

Для работы используется фрагмент мультиспектрального изображения Landsat 8, загружаемого в QGIS (рисунок 7).

Результат загрузки изображения представлен ниже.

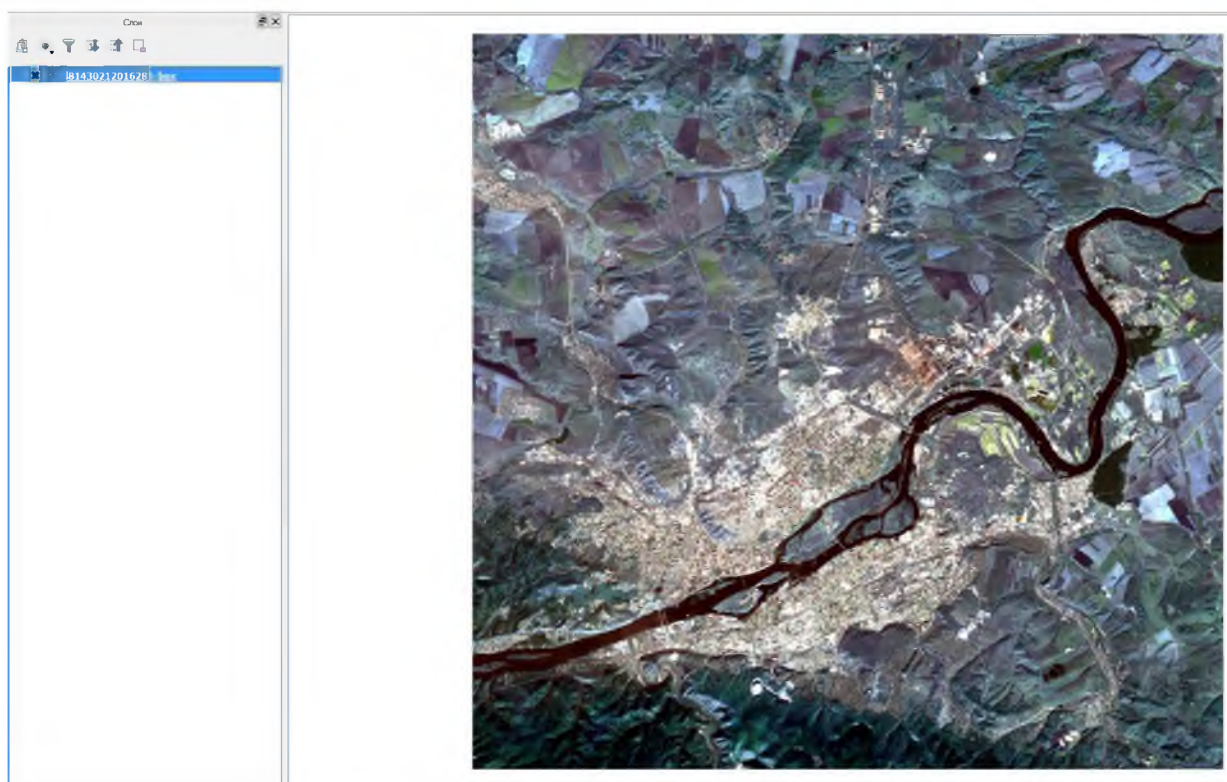


Рисунок 7 – Загруженный фрагмент мультиспектрального спутникового изображения в программу QGIS, RGB: 5-4-3

Далее, для корректной работы с изображением, необходимо провести атмосферную коррекцию.

Для того, чтобы исключить влияние атмосферы, проводится атмосферная коррекция методом DOS1 [12] с помощью плагина Semi-automatic classification plugin [2].

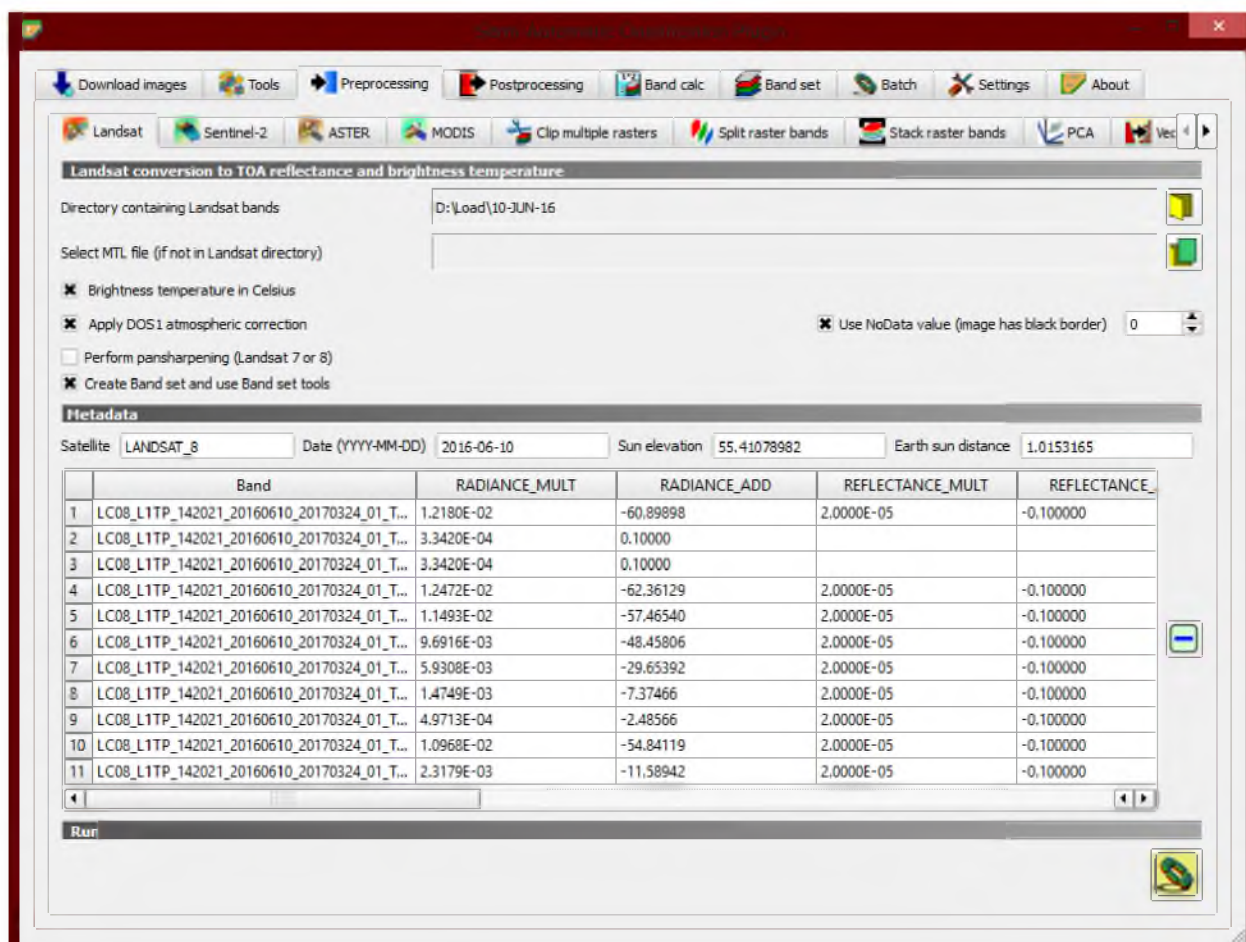


Рисунок 8 – Окно плагина Semi-automatic classification plugin с атмосферной коррекцией

Устанавливаем галочку в пункте Brightness temperature in Celsius (яркостная температура по Цельсию), чтобы перевести температуру из шкалы абсолютной температуры в более наглядную шкалу градусов Цельсия.

После проведённой атмосферной коррекции вычисляется NDVI, используя формулу (3).

3.2 Вычисление NDVI

Вычисляем Вегетационный индекс нормированной разности (NDVI), используя калькулятор растров и формулу (3).



Рисунок 9 – Вегетационный индекс NDVI

В результате получаем растр со значением NDVI.

Для отображения индекса NDVI используется стандартизованная непрерывная градиентная или дискретная шкала, показывающая значения в диапазоне от -1..1 в % или в диапазоне 0..200 (-100..100), что более удобно, так как каждая единица соответствует 1% изменения показателя. Благодаря особенности отражения в NIR -RED областях спектра, природные объекты, не связанные с растительностью, имеют фиксированное значение NDVI.

3.3 Вычисление коэффициента излучения поверхности по NDVI

Используя калькулятор растров в QGIS, вычисляется коэффициент излучения поверхности земли, используя формулу (4).

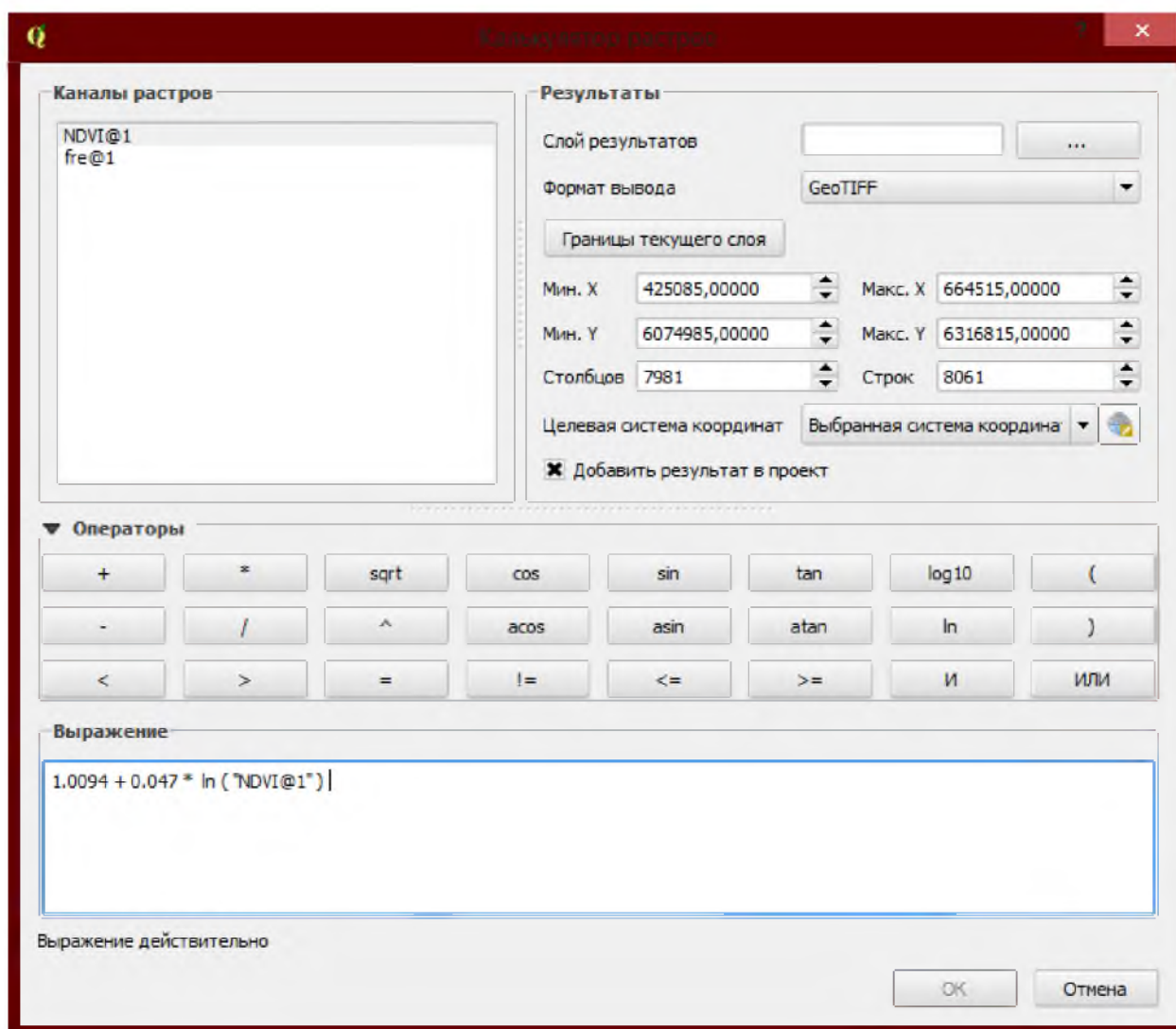


Рисунок 10 – Окно калькулятора растров для вычисления коэффициента излучения поверхности

Полученное изображение представлено ниже на рисунке 11.

В результате проделанной операции в калькуляторе растров, получаем растровое изображение со значениями коэффициента излучения поверхности.

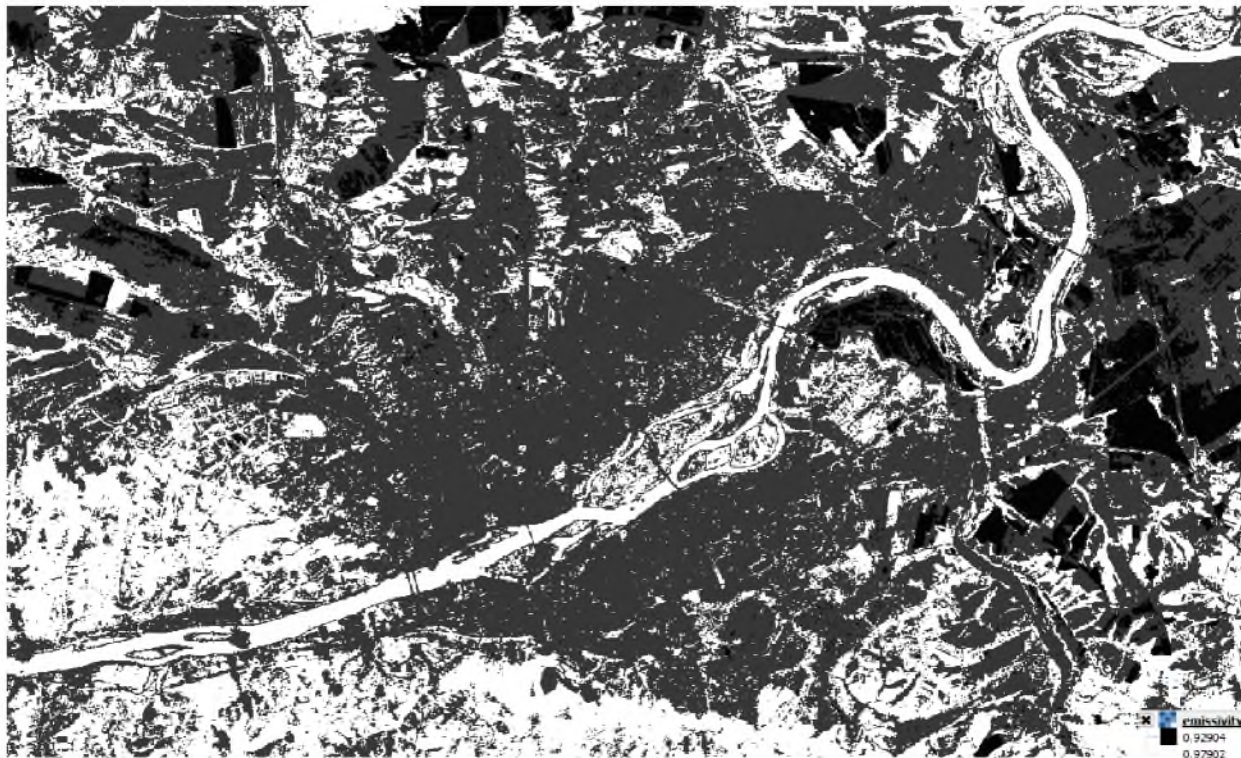


Рисунок 11 – Коэффициенты излучения поверхности

Получив растровое изображение коэффициента излучения поверхности, можно перейти к вычислению температуры поверхности земли.

3.4 Вычисление температуры поверхности

Исходя из имеющихся данных коэффициента излучения поверхности, представленных в виде растрового изображения, можно перейти непосредственно к получению температуры поверхности земли.

Вычисления проводятся с использованием дальнего инфракрасного канала №10 со спутника Landsat8.

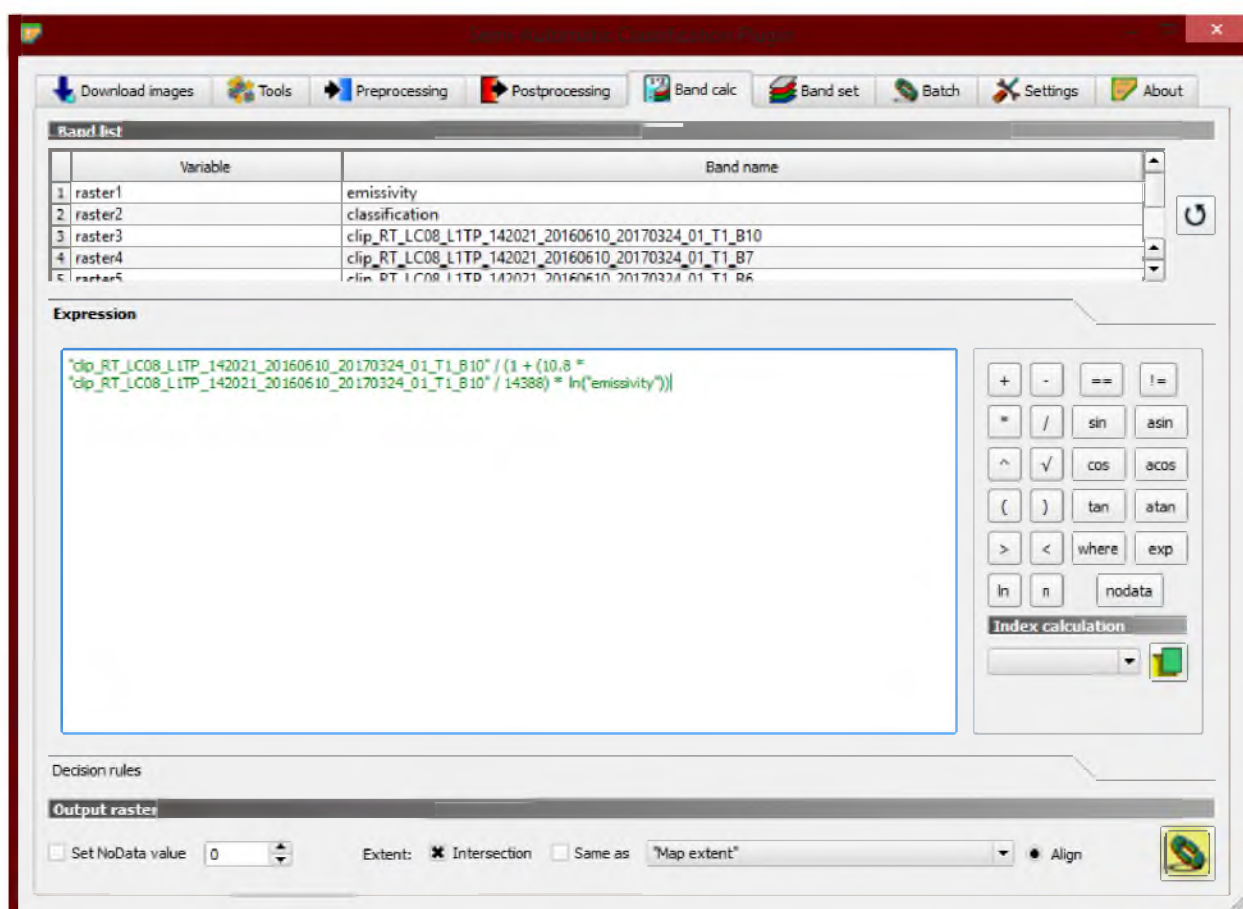


Рисунок 12 – Окно калькулятора растров для вычисления температуры поверхности

В результате проделанной операции, получено растровое изображение, показывающее температуру поверхности земли. Данное изображение представлено ниже на рисунке 13. Температура поверхности земли в г. Красноярске и окрестностях представлена в градусах Цельсия.

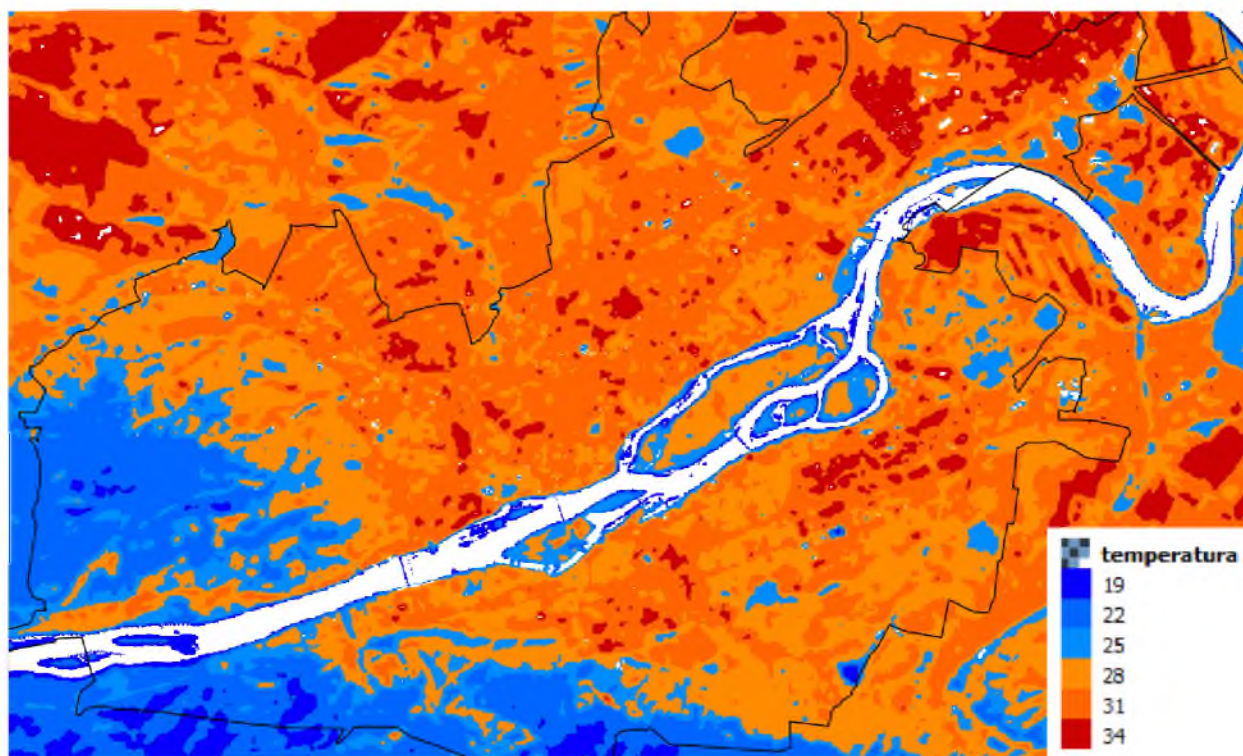


Рисунок 13 – Температура поверхности земли. Линией показана граница города Красноярска

В результате проделанной работы, получено растровое изображение, показывающее температуру поверхности земли в городе Красноярске.

4 Выявление многолетней динамики тепловых аномалий

4.1 Вычисление температуры в разные даты на территории г. Красноярск

Для того, чтобы обнаружить многолетнюю динамику изменения тепловых аномалий необходимо проанализировать несколько карт температуры поверхности земли в разные даты на территории г. Красноярск.

Для нахождения средней температуры поверхности необходимо воспользоваться вкладкой «гистограмма» в свойствах слоя (рисунок 14). Гистограмма распределения температур покажет, от каких значений необходимо отталкиваться при сравнении карт температуры поверхности земли, сделанных в различные даты.

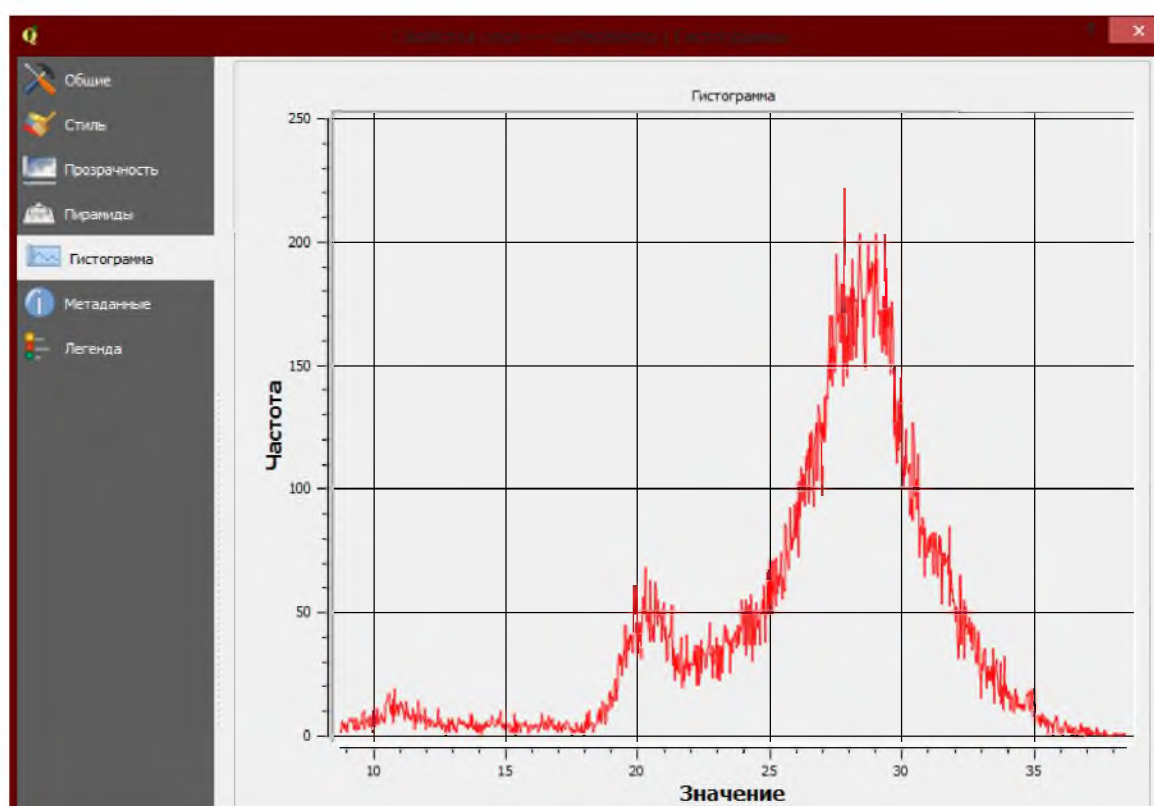


Рисунок 14 – Окно «свойства слоя» с гистограммой распределения температур

Рассмотрим температурную карту, на которой изображена территория города Красноярск, которая была построена по данным мультиспектрального изображения со спутника Landsat 8, с учётом гистограммы распределения температур, за 26.07.2015 г (рисунок 15).

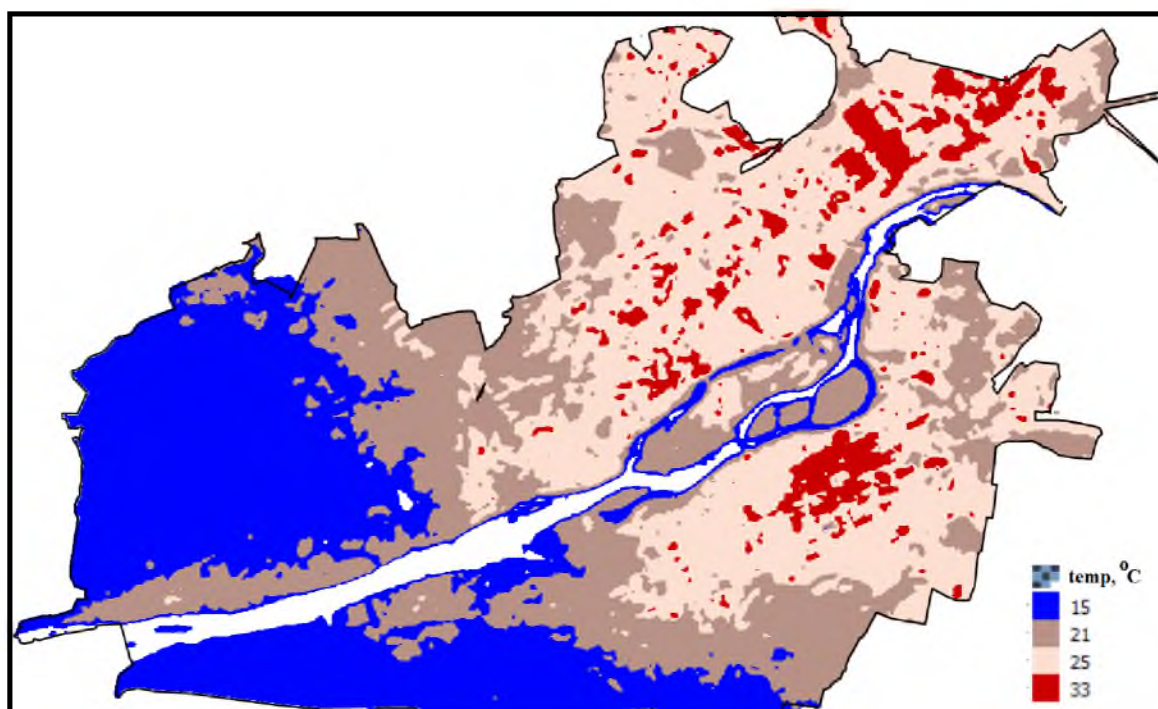


Рисунок 15 – Карта тепловых аномалий г. Красноярска, снимок 26.07.2015

На этой тепловой карте выделяются зоны тепловых аномалий (красный цвет). Для сравнения рассматривается другая карта температурных аномалий, которая была построена по данным мультиспектрального изображения со спутника Landsat 8 за 28.05.2017 г (рисунок 16).

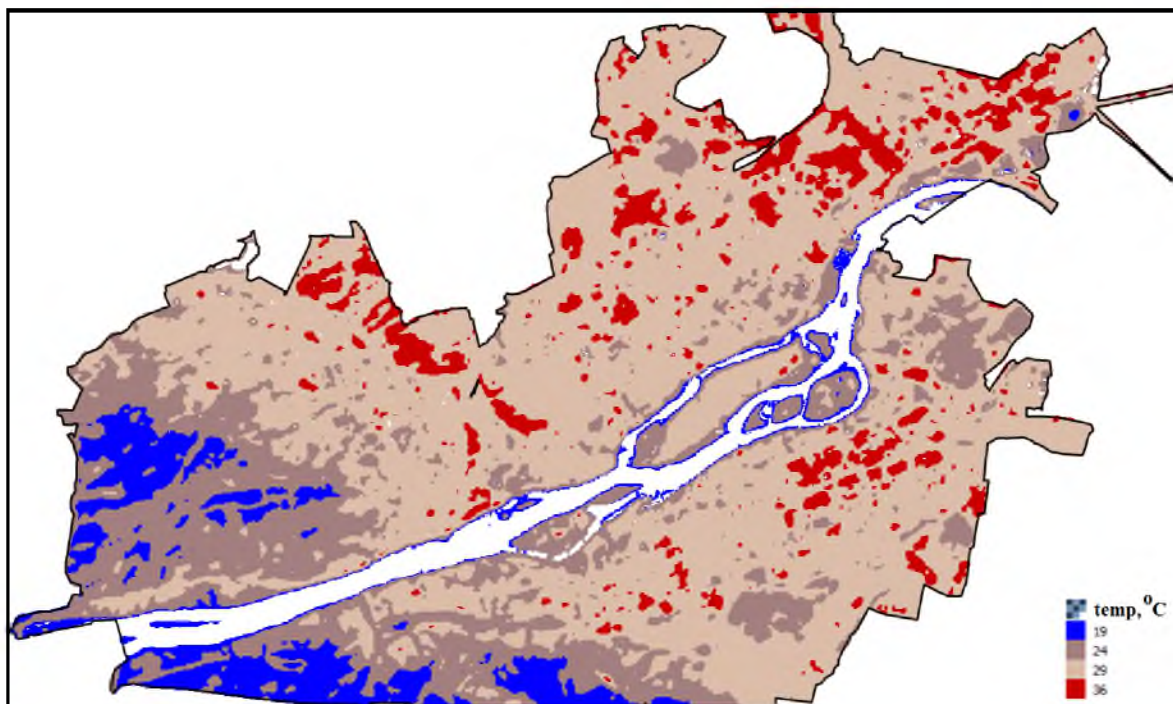


Рисунок 16 – Карта тепловых аномалий г. Красноярска, снимок 28.05.2017

Температурные условия на обеих картах позволяют сопоставить их для того, чтобы изучить динамику тепловых аномалий в городе Красноярске.

При анализе тепловой карты за 26.07.2015, как зоны тепловых аномалий ярко выделяются зоны работающих промышленных предприятий (красный цвет). Холодные зоны, где температура ниже средней по городу, приходятся, в основном, на участки близ Енисея и лесные территории.

При анализе тепловой карты за 28.05.2017, можно наблюдать примерно такую же картину для тех же промышленных предприятий, но с более низкой интенсивностью.

4.2 Результат работы

Исследование многолетней динамики тепловых аномалий в г. Красноярске по данным спутниковых изображений в тепловом инфракрасном диапазоне позволяет выявить следующие изменения: в целом основная локализация тепловых аномалий приходится на зоны промышленных предприятий, но замечается тенденция к снижению интенсивности в этих зонах. В холодных зонах, однако, просматривается обратная динамика – бурное многоэтажное строительство и бетонирование поверхности, особенно близ Енисея, повышает среднюю температуру в городе. Количество тёплых зон в городе Красноярск динамически увеличивается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленные в работе цели и задачи были полностью выполнены.

Исходные данные в виде мультиспектральных спутниковых изображений со спутника Landsat 8 были скачаны и обработаны для дальнейшей работы с ними. Была выполнена атмосферная коррекция спутниковых снимков.

Была подготовлена коллекция карт температур поверхности земли в городе Красноярск по данным спутниковых изображений в тепловом инфракрасном диапазоне спутника Landsat 8.

В ходе работы был выполнен анализ построенных карт температур поверхности земли. Выполнен анализ температурных аномалий в пределах города Красноярск. Так же была найдена и исследована динамика изменения тепловых аномалий в городе Красноярск.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island. Q J R Meteorol Soc 1982; Pp. 1–24.
2. Semi-Automatic Classification Plugin [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://se0miautomaticclassificationmanual-v4.readthedocs.io>
3. Solecki W.D., Rosenzweig C., Parshall, Lily; Pope, Greg; Clark, Maria; Cox, Jennifer; Wiencke, Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards. 6 (1): 2005 p. 39–49.
4. Valor E., Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European African and South American areas // Remote sensing of Environment. – Vol., № 1., 2004. – p. 28–31
5. Van de Griend A.A., Owen M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surface. International Journal of Remote Sensing (ISSN 0143-1161); 14; 6; p. 1119-1131
6. Вдовин В.М., Суркова Л.Е., Шурупов А.А. Предметно-ориентированные экономические информационные системы: Учебное пособие. Издательство "Дашков и К". 978-5-394-02262-3. 2013. 3-е изд. 388 с.
7. Кошарская А. В., Рыжкова И. В. Метеорология и гидрология. – 2001. – № 5. 5–21. Прогулки по Красноярску — Красноярск, 2005. — 36 с.
8. Красноярск [Электронный ресурс]: - Красноярскстат. Режим доступа: www.ias-statistika.ru
9. Ландсберг Г.Е. Климат города; Перевод с англ. под ред. Дубова А. С.. - Л. : Гидрометеиздат, 1983. - 248 с.; ISBN В пер. (В пер.): 3 р.
10. Локощенко М.А. Особенности городского «Острова тепла» в Москве, – 2012.
11. Основы ДЗЗ [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www.iki.rssi.ru/http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/heat_img/files/1/fizicheskie_osnovy.htm

12. Официальный сайт ПО QGIS [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://qgis.org/ru/site>.
13. Сайт Географические информационные системы и дистанционное зондирование [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/atcorr-dos.html>
14. Сайт геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/heat_img/files/3/kartografirovaniye_teplovyh_anomalii.htm
15. Сайт геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/heat_img/files/2/urbanizirovannye_territorii.htm
16. Сайт геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/heat_img/files/1/fizicheskie_osnovy.htm
17. Сайт Министерства геологической службы США [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov>
18. Сайт Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration, NASA) [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/modis>
19. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 329–337
20. Спутник ДЗЗ. Landsat 8. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://ecoruspace.me/Landsat+8.html>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Карты тепловых аномалий города Красноярск

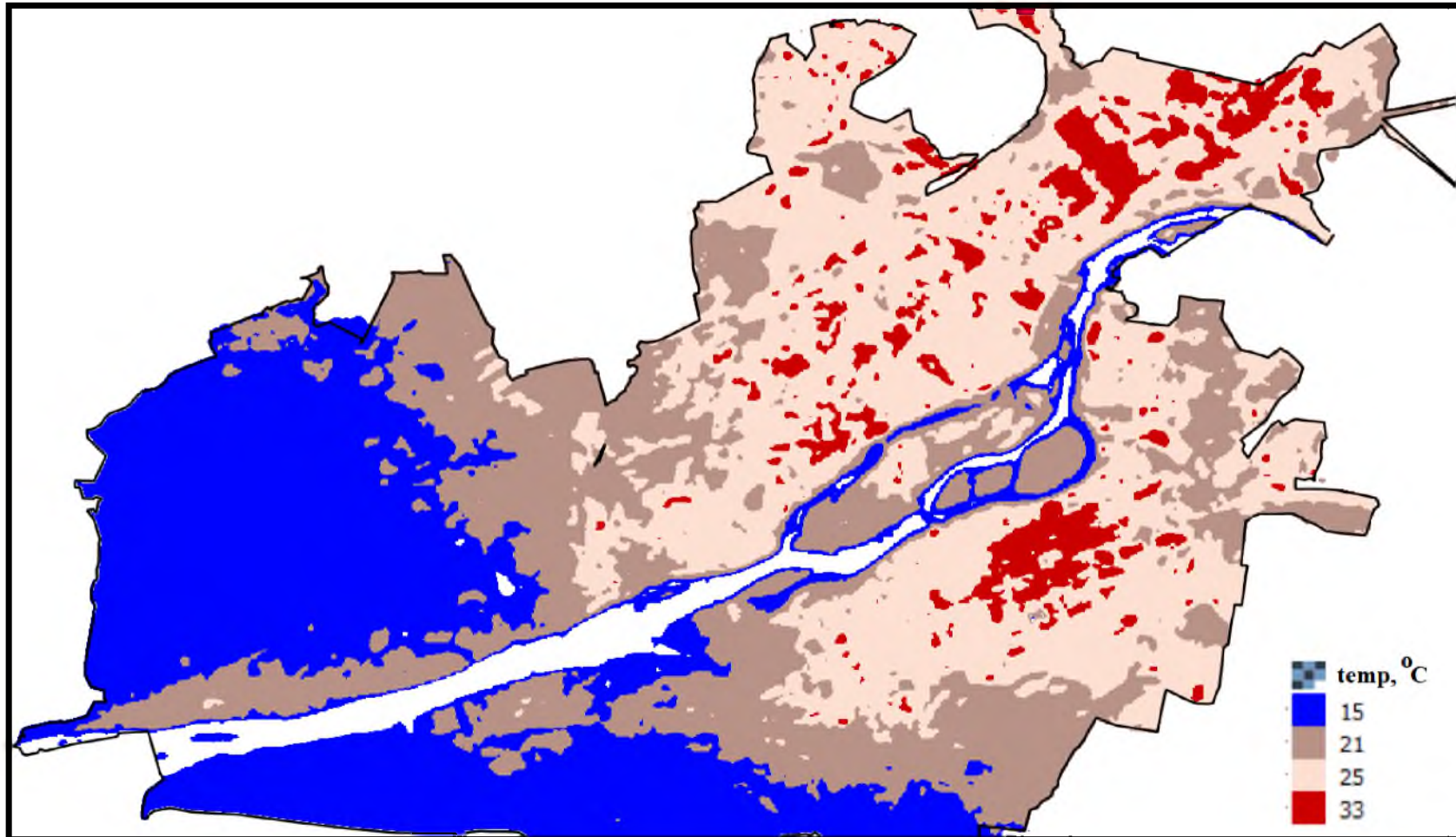


Рисунок А.1 – Карта тепловых аномалий города Красноярск, 26.07.2015

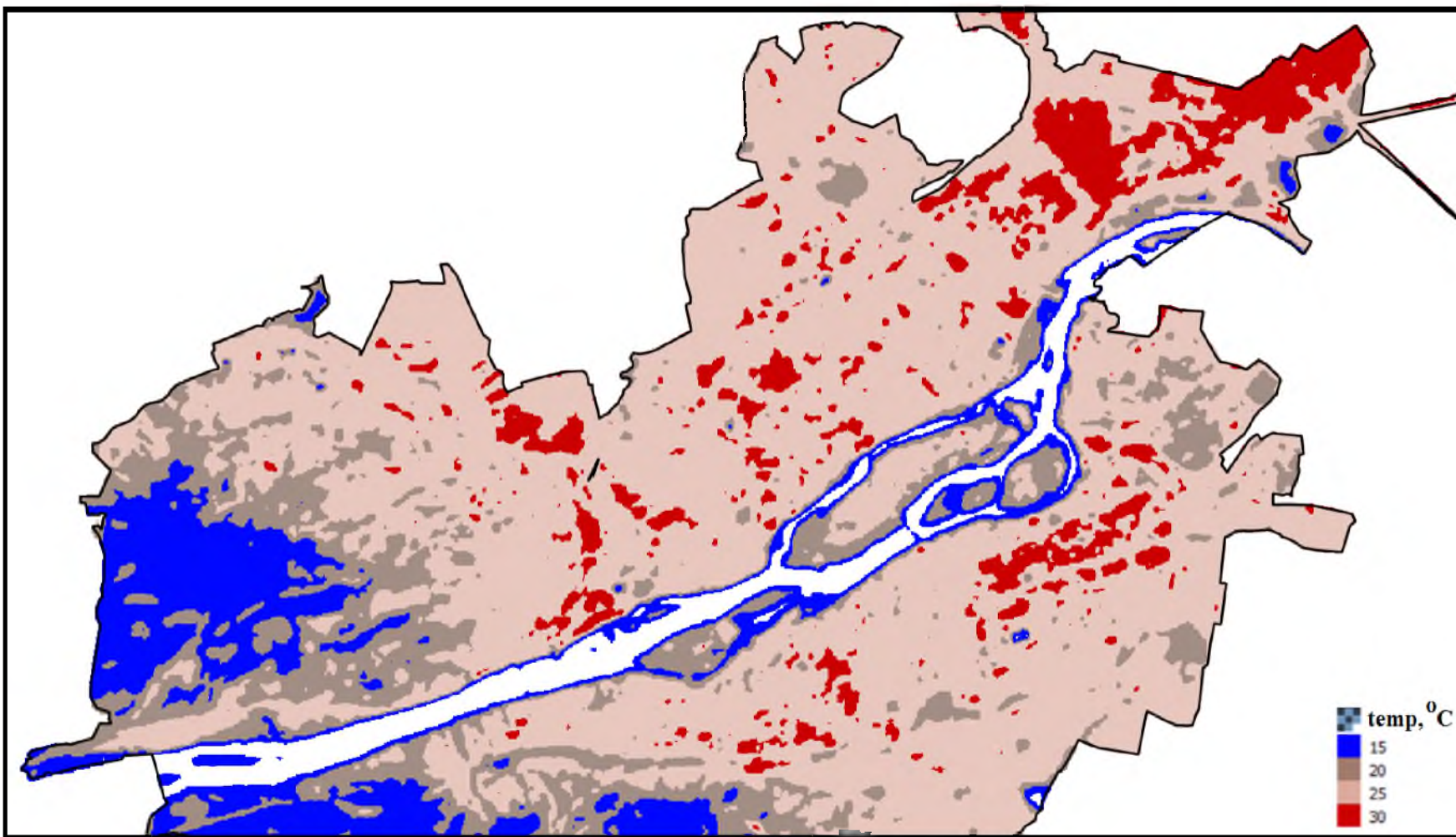


Рисунок А.2 – Карта тепловых аномалий города Красноярск, 10.06.2016

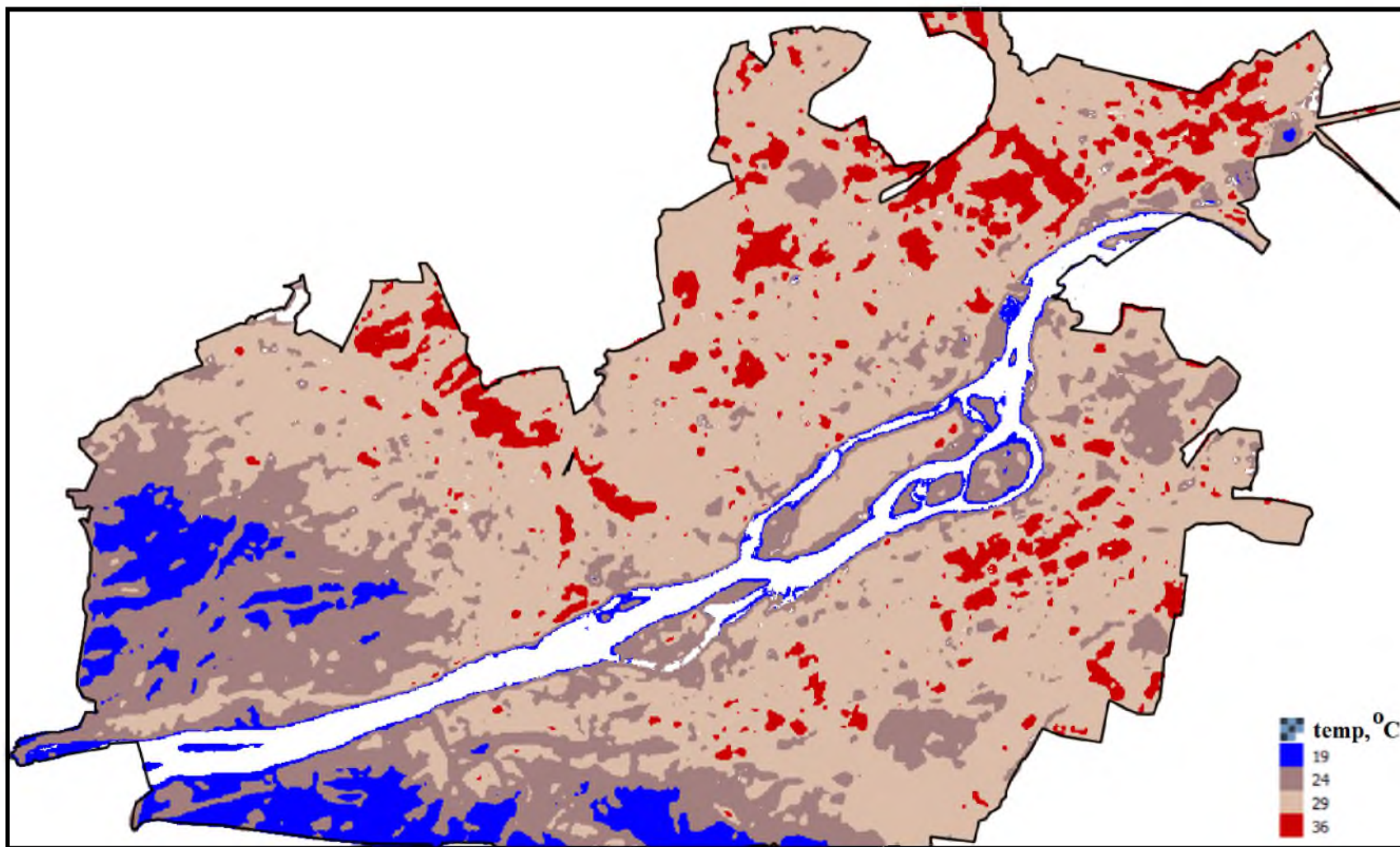


Рисунок А.3 – Карта тепловых аномалий города Красноярск, 28.05.2017